

MESURE DE LA PRESSION DE SURFACE ET METEOROLOGIE SUR MARS A L'AIDE DE L'INSTRUMENT MARS EXPRESS / OMEGA A. Spiga, F. Forget, B. Dolla, S. Vinatier¹, R. Melchiorri, P. Drossart², A. Gendrin, B. Gondet, Y. Langevin, J.P. Bibring³, ¹Laboratoire de Météorologie Dynamique, Université Pierre et Marie Curie, 4 place Jussieu, Paris, France (spiga@lmd.jussieu.fr, forget@lmd.jussieu.fr), ²Service d'aéronomie, Paris, France, ³Institut d'Astrophysique spatiale, Orsay, France

Introduction: OMEGA est un spectromètre infrarouge et visible embarqué à bord de la sonde Mars Express en orbite autour de la planète Mars depuis décembre 2003. Doté d'une très bonne couverture spectrale et spatiale, cet instrument de télédétection passive a permis de préciser l'histoire de la planète au travers d'une analyse fine de sa minéralogie [1], mais également d'approfondir l'analyse quantitative de sa composition atmosphérique [2]. Nous montrons pour notre part qu'OMEGA peut être par ailleurs utilisé comme instrument météorologique, et qu'il permet l'évaluation de la pression à la surface de Mars avec une très bonne précision.

Principe de la mesure: Sur Mars, la pression atmosphérique au sol prend des valeurs très faibles (entre 2 et 12 mbar), et se trouve être quasiment linéairement corrélée à la profondeur relative de la bande d'absorption à 2 microns du CO₂, composant principal de l'atmosphère. Par conséquent, une mesure par télédétection est possible, en exploitant les 25 spectels de l'instrument OMEGA compris entre 1.8 et 2.2 microns. Un modèle line-by-line de transfert radiatif de l'atmosphère martienne est utilisé pour simuler la réflectance dans la bande à 2 microns, étant donné la géométrie de l'observation (angles d'incidence, d'émergence et de phase), l'état de l'atmosphère (profondeur optique des poussières, profil de température idéalisé, tirés de la Mars Climate Database [3]) et les propriétés minéralogiques de la surface (prise en compte de l'influence des pyroxènes sur la bande à 2 microns [4]). La pression de surface et une constante de correction de l'albédo sont les deux paramètres libres d'entrée du modèle ; ils sont déterminés par minimisation de la distance entre le spectre mesuré par OMEGA et le spectre simulé par le modèle. Une cartographie des champs de pression n'est cependant pas envisageable avec un modèle line-by-line complet, très coûteux en temps de calcul. Des abaques sont donc construites sur une grille des paramètres d'entrée, et un gain substantiel de temps (sans trop sacrifier de précision) est réalisé par le biais de calcul par interpolations multi-dimensionnelles. L'influence radiative (absorption – diffusion simple) des poussières en suspension dans l'atmosphère martienne est également prise en compte, avec l'inclusion d'un modèle simple et efficace adapté des équations de Sobolev [5].

Validation de la mesure: Comparer la pression de surface mesurée par OMEGA et celle mesurée par

Viking Lander 1 il y a trente ans est un préliminaire nécessaire. A longitude solaire et temps local égaux, OMEGA mesure une pression d'environ 853 Pa là où VL1 mesurait 831 Pa. Pour cet exemple, notre mesure est donc quantitativement correcte, même si elle surestime quelque peu la valeur de la pression par rapport à Viking.

L'erreur relative entre un spectre obtenu par notre modèle de transfert radiatif (basé sur les hypothèses simplificatrices susmentionnées) et un spectre obtenu par le modèle complet SHDOM est inférieure à 2% à condition que l'angle d'incidence ne soit pas trop grand ($\mu_0 > 0.6$), que l'albédo de surface ne soit pas trop faible ($A_L > 0.1$), que l'insolation soit suffisante, et surtout que l'atmosphère ne soit pas trop poussiéreuse ($\tau < 0.4$). De plus, la présence de glace d'eau dans l'atmosphère (nuages) ou au sol (givre ou calotte permanente) empêche une mesure correcte de la pression, la bande à 2 microns étant alors déformée. L'instrument OMEGA, via la bande à 1.5 microns [6] ou le contraste bleu / rouge dans le canal visible, peut permettre un bon diagnostic de ces zones riches en glace à éviter pour le calcul de la pression. Enfin, et c'est le point le plus important, l'incertitude sur les paramètres d'entrée doit être pris en compte. Le rapport signal sur bruit d'OMEGA est excellent, donc les erreurs instrumentales peuvent avoir une influence, mais qui n'est pas majoritaire. Par contre, les valeurs de la température et d'opacité des poussières sont tirées de la Mars Climate Database pour une année typique (MY24). Il est donc possible que des écarts allant jusque +/- 15 K en température et +/- 0.2 en opacité des poussières soient constatés. En simulant, par une densité de probabilité gaussienne, l'occurrence de ces écarts sur un grand nombre de mesures de pression à partir d'un même spectre simulé de référence, il est possible de déduire l'erreur typique de la mesure : $RMS_{\text{error}} = +/- 10$ Pa. La mesure de la pression est donc d'une précision très satisfaisante, mais il faut mentionner que l'écart peut atteindre 30 à 40 Pa, si la température du profil est particulièrement surestimée et l'opacité des poussières particulièrement sous-estimée.

Un exemple de mesure dans le cas d'une atmosphère suffisamment claire est donné en figure 1. La mesure OMEGA est comparée à une valeur de pression de référence, « meilleure estimation » obtenue à partir des jeux de données MCD, MOLA haute résolution et VL1. L'accord est très satisfaisant autant qualitativement (les structures orographiques

sont reproduites) que quantitativement (même si OMEGA surestime légèrement la pression).

Météorologie: La pression de surface reflète au premier ordre l'altimétrie. Sur Terre, afin de pouvoir observer des phénomènes météorologiques, on se débarrasse de cette influence dominante par « réduction de la pression au niveau de la mer » ; sur Mars, une transformation hydrostatique identique est appliquée au champ de pression mesuré P_{Ω} : $P_{adtab} = P_{\Omega} e^{-\frac{z_0 - z}{H}}$ où z est l'altitude du pixel considéré, z_0 l'altitude référence, et H l'échelle de hauteur définie pour T_{1km} , une valeur de référence pour observer les ondes de marée thermiques et les ondes baroclines dans le champ de pression calculé par le GCM. Les incertitudes du positionnement de Mars Express sur son orbite provoquent un très léger décalage entre le relief mesuré par OMEGA et le relief de référence MOLA; pour calculer correctement P_{adtab} , il faut donc corriger ce biais.

Sur beaucoup d'orbites, le champ de pression au niveau de la mer est assez uniforme, à part à proximité des cratères et des montagnes. On observe une surpression de 15 à 20 Pa (par rapport à la pression réduite moyenne) du côté de la montagne exposé au vent, et une dépression d'autant dans le sillage de la montagne. Ces dépressions/surpressions locales sont en général observées dans les directions colinéaires au vent, et ne semblent pas corrélées à la direction de l'ensoleillement, ce qui en fait des signatures très probables d'interaction dynamique entre le relief et l'écoulement atmosphérique. Un modèle linéaire simple de ce type d'interaction [7] adapté aux conditions de Mars montre effectivement la présence de telles signatures. Dans le cas de la figure 2, la signature constatée peut trahir une telle interaction entre la colline et le vent d'ouest, mais également le passage d'une onde de gravité atmosphérique. Si les variations orographiques sont moins raides, de telles signatures n'apparaissent pas sur les cartes de pression ; on observe plutôt la présence de fronts ou de marais barométriques.

Ces conclusions ne sont que partielles. L'origine des structures mises en évidence sur les cartes de pression est une question complexe qui nécessite une analyse à l'aide d'un modèle météorologique méso échelle complet. L'effet des variations locales de température, ou l'influence des vents catabatiques pourrait être notamment déterminants.

Citations: [1] Bibring J.P. and the OMEGA team (2006) *Science* 312, Issue 5772 [2] Encrenaz T. and the OMEGA team (2005) *A&A* 441 [3] Forget et al. (2006) *Workshop on Mars atmosphere #2, Granada* [4] Gendrin A. et al. (2006) *LPSC #37, Abstract # 1858* [5] Sobolev V. V. (1975), *Pergamon Press* [6] Gondet B. et al., *see ref 3* [7] Drobinski P. et al. (2005), *GRL* 32, Issue 1

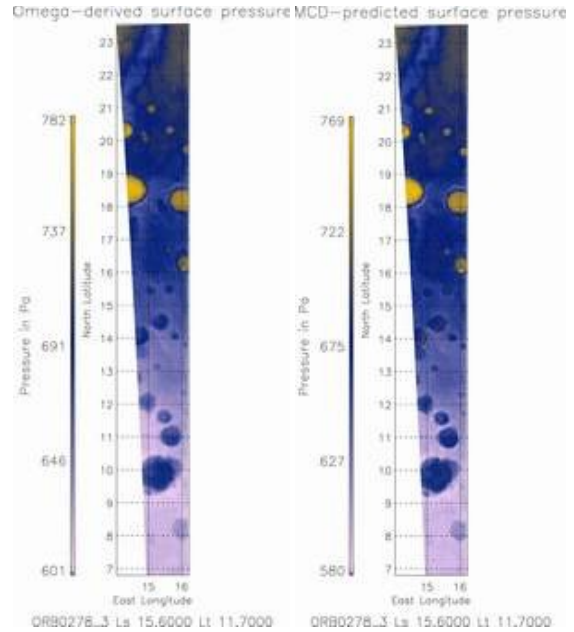


Figure 1 : Mesure de la pression de surface sur Mars par OMEGA et comparaison à la référence PRES0

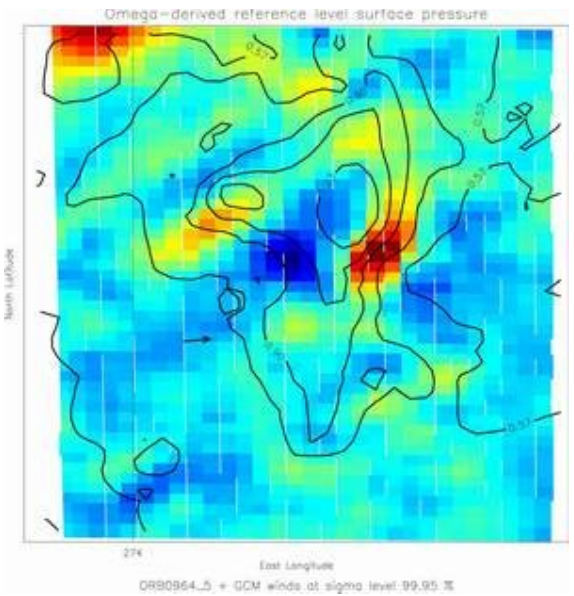


Figure 2 : Pression de surface mesurée par OMEGA (résolution fine d'environ 0.01°/0.01°) et ramenée à un niveau de référence (zones bleues : minima d'environ 496 Pa ; zones rouges : maxima d'environ 518 Pa). La colline au centre est située vers 33.6N, 274.2E, le temps local est 15.3 heures et la longitude solaire est 103°. L'amplitude des vents d'Ouest est environ 5 m/s. Les contours représentent la topographie (valeurs en km).